



# **POLYMERES ET ECO-CONCEPTION**

Module 2

---

## **MATERIAUX COMPOSITES**

### **Partie 1 : Généralités**

---



# Table des matières

|              |   |
|--------------|---|
| Introduction | 3 |
|--------------|---|

## Chapitre I

### Les matériaux composites : Généralités, constituants et architecture

|            |                                                                                   |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>I.1</i> | <i>Généralités sur les matériaux composites.</i>                                  | 5  |
| <i>I.2</i> | <i>Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants</i>  | 7  |
| I.2.1      | Composites à fibres                                                               | 7  |
| I.2.2      | Composites à particules                                                           | 8  |
| <i>I.3</i> | <i>Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants</i> | 8  |
| <i>I.4</i> | <i>Les constituants d'un matériau composite</i>                                   | 9  |
| I.4.1      | Les matrices                                                                      | 9  |
| I.4.1.1    | Les résines thermodurcissables                                                    | 10 |
| I.4.1.2    | Les résines thermoplastiques                                                      | 12 |
| I.4.1.3    | Les charges et additifs                                                           | 12 |
| I.4.2      | Les renforts                                                                      | 15 |
| I.4.2.1    | Les fibres de verre                                                               | 16 |
| I.4.2.2    | Les fibres de carbone                                                             | 16 |
| I.4.2.3    | Les fibres aramides                                                               | 17 |
| I.4.2.4    | Les fibres céramiques                                                             | 17 |
| I.4.2.5    | Fibres de polyéthylène de haut module                                             | 18 |
| I.4.2.6    | Les fibres naturelles                                                             | 18 |
| I.4.2.7    | Les caractéristiques mécaniques des fibres                                        | 18 |
| I.4.2.8    | Les principales combinaisons de résine et de renforts                             | 19 |
| I.4.3      | Architecture de renforcements                                                     | 19 |
| I.4.4      | Ensimage                                                                          | 22 |

**Chapitre II****Mise en oeuvre et structures des matériaux composites**

|             |                                                                             |           |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>II.1</i> | <i>Mise en oeuvre et procédés des matériaux composites</i>                  | <i>23</i> |
| II.1.1      | Classification des procédés en deux grandes familles                        | 25        |
| II.1.2      | Description des principaux procédés                                         | 26        |
| II.1.2.1    | Moulage au contact                                                          | 26        |
| II.1.2.2    | Moulage par projection simultanée                                           | 28        |
| II.1.2.3    | Moulage sous vide                                                           | 30        |
| II.1.2.4    | Moulage par injection basse pression de résine - RTM                        | 31        |
| II.1.2.5    | Moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression                    | 33        |
| II.1.2.6    | Moulage l'infusion de résine sous membrane souple                           | 35        |
| II.1.2.7    | Moulage par injection de compound - BMC                                     | 36        |
| II.1.2.8    | Moulage par compression de mat préimprégné - SMC                            | 37        |
| II.1.2.9    | Moulage par enroulement filamentaire                                        | 39        |
| II.1.2.10   | Moulage par centrifugation                                                  | 40        |
| II.1.2.11   | Moulage par pultrusion                                                      | 42        |
| II.1.2.12   | Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres broyées<br>- RRIM | 43        |
| II.1.2.13   | Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues<br>- SRIM | 44        |
| <i>II.2</i> | <i>Architecture des matériaux composites</i>                                | <i>45</i> |
| II.2.1      | Monocouches                                                                 | 45        |
| II.2.2      | stratifiés                                                                  | 46        |
| II.2.2.1    | Désignation des structures stratifiées                                      | 46        |
| II.2.2.2    | Différents types de stratifiés et exemples de codification                  | 48        |
| II.2.3      | Sandwichs                                                                   | 48        |

# Introduction

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

Cependant, pour faire valoir ces atouts et atteindre ses objectifs, l'industrie des matériaux composites doit mieux intégrer dans sa stratégie de croissance la composante environnementale du développement durable. Les évolutions réglementaires en termes de recyclabilité et d'hygiène et sécurité constituent également des enjeux forts que cette industrie doit relever pour maintenir sa croissance.

Les matériaux composites (à matrices métalliques, élastomères, polymères ou céramiques) offrent aux industriels et aux designers des possibilités nouvelles d'associer fonction, forme et matériaux, au sein de réalisations, matériaux, systèmes de plus en plus performants. Poids, anisotropie, plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principe. Des processus nouveaux de conception, d'industrialisation et de fabrication permettent d'étendre les possibilités techniques, et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

Les aspects financiers sont de plus en plus importants : l'industrie des composites est en effet fortement capitalistique ; d'importants investissements (R&D, pré-série, équipements industriels...) sont nécessaires avant de pouvoir réaliser un chiffre d'affaires significatif. Une entreprise doit pouvoir offrir à ses actionnaires et à ses partenaires financiers une rentabilité et une transparence compétitives.

Parmi les composites, on distingue deux types : les composites grande diffusion (GD) et les composites haute performance (HP).

Les GD représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort avoisinant 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (+ de 99% des renforts utilisés!). Renforts et matrices sont à des coûts voisins.

Les HP, principalement utilisés dans l'aéronautique sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieure à celles des métaux, contrairement aux GD. Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développés pour les HP

# Chapitre I

## Les matériaux composites : Généralités, constituants et architecture

Au cours de ce chapitre, nous présenterons les principales caractéristiques des matériaux composites qui expliquent leurs nombreuses utilisations dans divers domaines industriels. Ainsi, avant de décrire le comportement mécanique de ces matériaux dans le prochain chapitre, nous nous attacherons à présenter le matériau en lui-même, c'est-à-dire ses constituants et ses différentes architectures ainsi que son procédé d'élaboration et ses principaux usages.

### I.1 Généralités sur les matériaux composites

Dans un sens large, le mot "composite" signifie "constitué de 2 ou plusieurs parties différentes". En fait, l'appellation *matériau composite* ou *composite* est souvent utilisée dans un sens plus restrictif, qui sera précisé par la suite. Nous en donnons pour l'instant la définition générale : Un matériau composite est constitué de l'assemblage de matériaux de natures différentes c'est-à-dire non miscible, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau I.1.

Ainsi, un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques.

|                                           | CONSTITUANTS                                               | DOMAINES D'APPLICATION                   |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1. <i>Composites à matrice organique</i>  |                                                            |                                          |
| Papier, carton                            | résine/charges/fibres cellulosiques                        | Imprimerie, emballage, etc...            |
| Panneaux de particules                    | Résine/ copeaux de bois                                    | Menuiserie                               |
| panneaux de fibres                        | résine/ fibres de bois                                     | Bâtiment                                 |
| Toiles enduites                           | Résines souples/tissus                                     | sports, bâtiment                         |
| Pneumatiques                              | Caoutchouc/toile/acier                                     | Automobile                               |
| Stratifiés                                | Résine/charges/fibres de verre, de carbone...              | Domaines multiples                       |
| Plastiques renforcés                      | résines/micro sphères                                      |                                          |
| 2. <i>Composites à matrice minérale</i>   |                                                            |                                          |
| Béton                                     | Ciment/sable/granulats                                     | Génie civil                              |
| Composites carbone-carbone                | Carbone/ Fibres de carbone                                 | Aviation, espace, sports, biomédecine... |
| Composite céramique                       | Céramique/ fibres Céramiques                               | Pièces thermo-mécaniques                 |
| 3. <i>Composites à matrice métallique</i> |                                                            |                                          |
|                                           | Aluminium/fibres de bore                                   | Espace                                   |
|                                           | Aluminium/fibres de carbone                                | Espace                                   |
| 4. <i>Sandwiches</i>                      |                                                            |                                          |
| peaux                                     | Métaux, stratifiés, ...                                    |                                          |
| Ames                                      | Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, ... | Domaines multiples                       |

TABLE I.1 - *Exemples de matériaux composites, pris au sens large*

Les propriétés de ces matériaux résultent donc :

- des propriétés des matériaux constituants
- de leur distribution géométrique
- de leurs interactions...

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- la nature des constituants
- la géométrie du renfort, sa distribution
- la nature de l'interface matrice-renfort

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), ... Si l'ensemble de ces paramètres concourent à déterminer

les propriétés du composite, les modélisations descriptives ne tiendront compte que de certains paramètres, du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu. Par exemple, la forme du renfort sera schématiquement approchée par des sphères ou des cylindres.

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique ou par la fraction massique. La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume est aussi un paramètre important. Une distribution uniforme assurera une "homogénéité" du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure. Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas de matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie du matériau composite. Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptées aux propriétés souhaitées

## **I.2 Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants**

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en 2 grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

### **I.2.1 Composites à fibres**

Les renforts se trouvent sous forme de fibres qui peuvent être soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes...L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- la nature des constituants
- la proportion des constituants
- l'orientation des fibres

suivant le cahier des charges imposées.

### **I.2.2 Composites à particules**

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait... Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles dans des métaux ductiles augmenteront leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante.

Egalement, des particules d'élastomères peuvent être incorporées dans les matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leur propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse. Toutefois, compte tenu de leurs diversités, ces matériaux ne seront pas étudiés dans le cadre de ce cours.

En effet, nous étudierons plus particulièrement les matériaux composites à renfort fibre longue continue utilisés dans l'industrie nautique, automobile, aéronautique et spatiale. Les pièces structurales étant réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée.

## **I.3 Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants**

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer :

1. Composites à *matrice organique* (résine, charges), avec :
  - des fibres minérales : verre, carbone, etc
  - des fibres organiques : kevlar, polyamide, etc
  - des fibres métalliques : bore, aluminium, etc
2. Composites à *matrice métallique* (alliages d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :
  - des fibres minérales : carbone, carbure de silicium, etc
  - des fibres métalliques : bore,
  - des fibres métallo-minérales : fibres de bores revêtues de carbure de silicium

### 3. Composites à *matrice minérale* (céramique), avec :

- des fibres métalliques : bore,
- des particules métalliques
- des particules minérales : carbures, nitrures, ...

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000°C pour une matrice céramique.

## I.4 Les constituants d'un matériau composite

Nous présentons maintenant les différents types de matrices et renforts classiquement employés dans l'industrie. Rappelons que les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques.

### I.4.1 Les matrices

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200°C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est représentée sur la figure I.1.

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement. Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices (voir figure I.2).

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pont (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un chauffage. La transformation est donc irréversible.

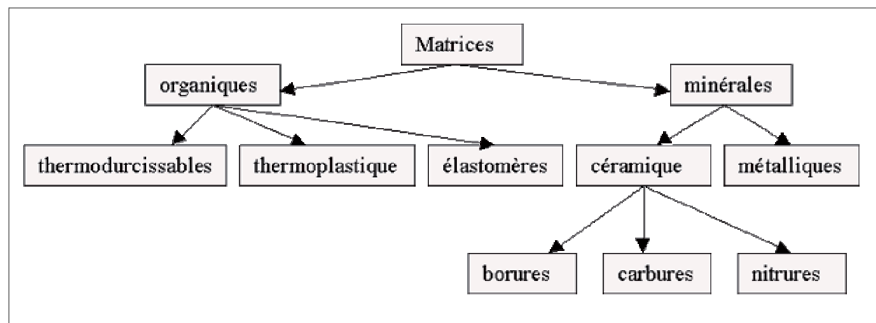


FIGURE I.1 - Classification des différents types de matrice

| Matrices               | Thermoplastiques TP         | Thermodurcissables TD           |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Etat de base           | solide prêt à l'emploi      | liquide visqueux à polymériser  |
| Stockage               | illimité                    | réduit                          |
| Mouillabilité renforts | difficile                   | aisée                           |
| Moulage                | chauffage + refroidissement | chauffage continu               |
| Cycle                  | court                       | long                            |
| Tenue au choc          | assez bonne                 | limitée                         |
| Tenue thermique        | réduite                     | bonne                           |
| Chutes et déchets      | recyclables                 | perdus ou recyclés en charges   |
| Conditions de travail  | propreté                    | émanation pour "méthode humide" |

FIGURE I.2 - Principales différences entre TP et TD

#### I.4.1.1 Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- **les polyesters insaturés** : ce sont les résines les plus utilisées dans les applications GD. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker. Parmi les avantages de ces résines, nous pouvons retenir : une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé, la facilité de mise en oeuvre, une bonne tenue chimique, un faible coût de production...
- Par les inconvénients, nous noterons : une tenue médiocre en température (inférieure à

120°C en service continu), une sensibilité à la fissuration notamment en cas de chocs, un retrait important de l'ordre de 8 à 10%, une dégradation à la lumière par les UV, une inflammabilité...

- **les vinylesters** : ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles.
- les résines **époxy** (ou époxydes) constituent la résine type des composites HP. En effet, elles conduisent à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de cuisson très longues ( de plusieurs heures à plusieurs dizaine d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100°).  
Parmi les avantages de ces résines, nous retiendrons : de bonnes propriétés mécaniques supérieurs à celles des polyesters, une bonne tenue aux températures élevées, une excellente résistance chimique, un faible retrait au moulage...  
Parmi les inconvénients, nous citerons : un temps de polymérisation long, un coût élevé, une sensibilité à la fissuration.
- **les résines phénoliques** sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en oeuvre mais présente certains avantages tels que une bonne résistance aux agents chimiques, à la chaleur et au fluage, un faible retrait ainsi que de bonnes caractéristiques mécaniques.
- **les polyuréthannes** ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule.

D'autres résines TD sont utilisées pour des applications particulières comme par exemple le silicone (bonnes qualités électrique, thermique, chimique), les poly-imides (composites HP pour une bonne stabilité à la température). En Europe, les composites à matrice thermodurcissables (TD) représentent **70% de la totalité des composites transformés**.

#### **- Caractéristiques mécaniques moyennes des résines thermodurcissables non renforcées**

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Les caractéristiques mécaniques de résines thermodurcissables sont présentées dans le tableau I.3

#### **I.4.1.2 Les résines thermoplastiques**

Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (P.V.C.), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques.

Les thermoplastiques (TP) présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, l'appellation « composite » n'est pas interprétée d'une manière uniforme, et certains industriels n'y incluent pas les thermoplastiques renforcés de fibres courtes qui représentent pourtant 90% des composites à matrice thermoplastique. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

- les polyamides (PA) 6, 6-6, 12
- les polytéréphtalate éthylénique (PET) et butylénique (PBT)
- les polycarbonate (PC)
- les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE)
- les polyoxyméthylène (POM)
- le polypropylène (PP) est un polymère semi-technique, peu onéreux, assez stable en température, mais combustible.

D'autres résines TP commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo-stabilité (tenue thermique supérieure à 200°C) et de bonne tenue mécanique :

- le polyamide-imide (PAI)
- le polyéther-imide (PEI)
- le polyéther-sulfone (PES)
- le polyéther-éther-cétone (PEEK).

Les composites entièrement plastiques devraient prochainement atteindre la phase industrielle.

#### **- Caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques non renforcées**

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Les caractéristiques mécaniques de résines thermoplastiques sont présentées dans le tableau I.3.

#### **I.4.1.3 Les charges et additifs**

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (charges renforçantes, ex : charges sphériques creuses 5 à 150 µm). Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites.

| Résines | nom              | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | E (MPa) | $\nu$ | R (MPa) | $\alpha$<br>$\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ | Prix<br>(F/kg) |
|---------|------------------|-----------------------------|---------|-------|---------|-------------------------------------------|----------------|
| TD      | Polyester        | 1300                        | 3800    | 0.37  | 88      | 100                                       | 15             |
|         | Vinylester       | 1200                        | 3500    | 0.35  | 81      | 65                                        | 18             |
|         | Epoxyde          | 1220                        | 5200    | 0.38  | 121     | 40                                        | 40             |
|         | Silicone         | 1550                        | 1000    | 0.45  | 3       | 30                                        | 200            |
|         | Polyimide        | 1217                        | 3450    | 0.35  | 80      | 36                                        | 150            |
|         | Phénolique       | 1350                        | 3000    | 0.36  | 70      | 80                                        | 10             |
| TP      | Polyamide        | 1130                        | 1900    | 0.33  | 70      | 85                                        | 25             |
|         | Polycarbonate    | 1100                        | 2300    | 0.33  | 60      | 70                                        | 30             |
|         | Polyester saturé | 1310                        | 2800    | 0.33  | 55      | 90                                        |                |
| Métaux  | Aluminium        | 2630                        | 69000   | 0.33  | 358     | 23                                        | 13             |
|         | Acier XC10       | 7850                        | 210000  | 0.29  | 1000    | 1000                                      | 10             |
|         | Cuivre           | 8940                        | 119000  | 0.30  | 350     | 17                                        | 11             |
|         | Magnésium        | 1660                        | 42000   | 0.30  | 280     | 25                                        | 27             |

FIGURE I.3 - Caractéristiques mécaniques moyennes des résines therm durcissables et thermoplastiques non renforcées

#### – Les charges

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé. Ainsi, on peut classer ces charges selon 2 types : **charges renforçantes** et **charges non renforçantes**.

Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

#### 1. Charges renforçantes

##### – charges sphériques

L'intérêt essentiel de ces charges réside dans leur forme sphérique qui évite les

concentrations de contraintes et par conséquent diminue la susceptibilité à la fissuration de la matrice par rapport à des charges non sphériques. Ces charges sphériques sont généralement appelées microbilles ou microsphères qui peuvent être pleines ou creuses (diamètre généralement compris entre 10 et 15  $\mu\text{m}$ ). elles peuvent être en verre, en carbone ou en matière organique (époxyde, phénolique, polystyrène, ...). Les microbilles de verre creuses représentent plus de 99% des charges sphériques utilisées et sont souvent incorporées dans des résines époxydes et polyesters. Leur principal avantage des microbilles de verre creuses réside dans une masse volumique faible (100 à 400  $\text{kg/m}^3$ ), apportant une augmentation du module spécifique de la résine chargée et de sa tenue en compression.

L'usage de ces microbilles creuses de verre est limitée à des mises en oeuvre à basse pression du fait de la faible résistance à l'écrasement des sphères creuses.

les avantages essentiels de leur incorporation dans une résine sont :

- diminution de la masse volumique
- augmentation du module de la résine
- amélioration de la tenue en compression

Il existe d'autres types de microbilles telles que les microbilles creuses de carbone ou organiques (époxyde, phénolique..) qui sont généralement plus chères que les microbilles de verre.

Parmi les autres microbilles utilisées figurent les microbilles de verres pleines qui offrent la possibilité de mise en oeuvre avec les résines à des pressions élevées mais la masse volumique est plus élevée (2500  $\text{kg/m}^3$ ).

#### – **charges non sphériques**

Parmi les charges renforçantes non sphériques, le mica est le matériau le plus utilisé, notamment dans des applications électriques ou électroniques.

## 2. **Charges non renforçantes**

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

- Charges de faible coût
- Charges ignifugeantes (ex : hydrate d'alumine, oxyde antimoine)
- Charges conductrices et antistatiques (ex : poudres ou poudrettes métalliques, noir de carbone, filaments métalliques...)

### – Les additifs

Les additifs se trouvent en faible quantité ( quelques % et moins )et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage : pour faciliter le façonnage de la résine et réduire la tendance de la résine à adhérer au moule...
- pigments et colorants : les pigments sont des produits insolubles se présentant sous forme de poudres ou de paillettes ; les colorants sont des composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant organique.
- agents anti-retrait ;
- agents anti-ultraviolets.

### I.4.2 Les renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est représentée figure I.4.

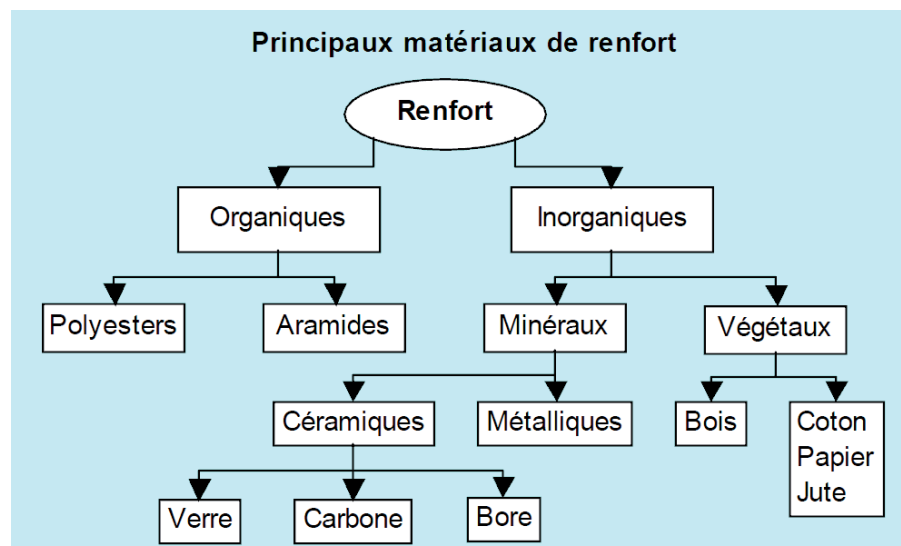


FIGURE I.4 - Classification des différents types de renforts

#### **I.4.2.1 Les fibres de verre**

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance - prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Les fibres de verre sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1250°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues. Suivant les application auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en trois qualités :

- fibres E pour les composites grande diffusion (GD)
- fibres D pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés)
- R pour les composites haute performance (HP).

Les fibres de verre (500 kT/an en Europe) constituent le principal renfort, utilisé dans plus de 95% des matériaux composites, et plus particulièrement pour les produits de grande diffusion (GD). Elles offrent, pour un prix raisonnable de 10 à 50 F/kg :

- une bonne adhérence entre fibres et résines (matrices)
- de bonnes propriétés mécaniques, mais inférieures à celles de la fibre de carbone
- des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications

En Europe, les fibres de verre utilisées dans les composites, représentant 500 000 tonnes/an, sont utilisées dans :

- la plupart des composites « grande diffusion » (automobile, construction, construction électrique)
- certains composites « hautes performances » avec des fibres de verre « R »

L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par :

- une rigidité insuffisante pour certaines applications comme les pièces de structure primaire en aéronautique
- un vieillissement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées

Les fibres de verre utilisées dans les composites ont un diamètre de l'ordre de 10 micromètres, nettement supérieur au diamètre critique (de l'ordre de 3 micromètres) pour que la fibre ne présente pas de risque respiratoire et ne puisse engendrer des cancers.

Les principaux producteurs sont : Saint Gobain Vetrotex, Owens Corning, PPG.

#### **I.4.2.2 Les fibres de carbone**

La production actuelle de fibres de carbone destinées aux renforts de composites s'établit à 3.000 tonnes/an. Elles sont principalement utilisées pour les composites « hautes performances » en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs.

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseurs utilisées sont des fibres

acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le Brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone.

Les fibres de carbone souffrent de handicaps techniques qui limitent également leur utilisation pour certaines applications dans les composites :

- un allongement à la rupture insuffisant (inférieur à 2%) comparé à celui des fibres de verre et d'aramide (3 à 4%)
- une caractérisation encore insuffisante pour permettre une conception fiable à prix modéré

Les fibres de carbone pourraient être utilisées à l'avenir en combinaison avec des fibres de verre.

#### I.4.2.3 Les fibres aramides

Les fibres aramides, souvent appelées KEVLAR, ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des ensimages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type Verre-Kevlar ou Carbone-Kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ex : ski, raquette de tennis).

Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances

#### I.4.2.4 Les fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée (500°C - 2000°C). Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

Les fibres de Carbure de Silicium " Sic " : Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

Les fibres de Bore " B " : Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

Les fibres de Bore carbure de silicium " Bor-Sic ".

#### **I.4.2.5 Fibres de polyéthylène de haut module**

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

Leur champ d'application est limité par leurs principales faiblesses :

- mauvaise résistance à la température (fluage dès 90°C ; l'aramide ne se dégrade qu'à 400°C)
- mauvaise adhérence entre les fibres et la matrice

#### **I.4.2.6 Les fibres naturelles**

Les fibres naturelles pourront constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur plus grande facilité de recyclage lorsque leurs propriétés physiques seront mieux appréhendées.

Des composites avec des fibres naturelles (lin, chanvre, mais également sisal) sont en cours de développement car ces fibres apparaissent plus écologiques que les fibres de verre, en particulier plus facilement recyclables car elles peuvent être brûlées. En outre :

- leurs propriétés mécaniques pourraient atteindre celles des fibres de verre (module de Young)
- la fibre se travaille très facilement avec les technologies du textile (tissage)

Les fibres naturelles présentent plusieurs verrous techniques majeurs pour une utilisation massive dans les matériaux composites :

- elles ne sont pas fabriquées par un processus industriel et la reproductibilité de leurs caractéristiques physiques ne peut donc pas être parfaitement maîtrisée
- la quantité et la qualité dépendent de l'environnement et de l'humidité (reprise jusqu'à 8 ou 10% du taux d'humidité)
- les fibres naturelles sont difficilement calibrables et plus difficilement manipulables que les fibres de verre (en particulier pour le lin)
- leurs caractéristiques mécaniques (résistance à la traction) moyennes ont engendré plusieurs échecs dans les projets d'intégration des composites à fibres naturelles dans l'automobile

Certains producteurs de non-tissés appliquent des procédés textiles traditionnels aux fibres naturelles pour des applications de basse ou moyenne gamme.

#### **I.4.2.7 Les caractéristiques mécaniques des fibres**

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible, et celles à forte résistance ont un module faible. Le tableau I.5 récapitule quelques caractéristiques moyennes des fibres et renforts.

| Renforts           | Diamètre du filament (µm) | Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> ) | Module d'élasticité longitudinal (MPa) | Module de cisaillement (MPa) | Coefficient de Poisson | Contrainte de rupture (traction) MPa | Allongement à rupture % | Coefficient de dilatation thermique °C <sup>-1</sup> |
|--------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
|                    | d                         | Mv                                    | E                                      | G                            | k                      | C <sub>r</sub>                       | A                       | α                                                    |
| Verre E            | 16                        | 2 600                                 | 74 000                                 | 30 000                       | 0,25                   | 2 500                                | 3,5                     | 0,5*10 <sup>-5</sup>                                 |
| Verre R            | 10                        | 2 500                                 | 86 000                                 |                              | 0,2                    | 3 200                                | 4                       | 0,3*10 <sup>-5</sup>                                 |
| Carbone HM         | 6.5                       | 1 800                                 | 390 000                                | 20 000                       | 0,35                   | 2 500                                | 0,6                     | 0,08*10 <sup>-5</sup>                                |
| Carbone HR         | 7                         | 1 750                                 | 230 000                                | 50 000                       | 0,3                    | 3 200                                | 1,3                     | 0,02*10 <sup>-5</sup>                                |
| Kevlar 49          | 12                        | 1 450                                 | 130 000                                | 12 000                       | 0,4                    | 2 900                                | 2,3                     | -0,2*10 <sup>-5</sup>                                |
| Bore               | 100                       | 2 600                                 | 400 000                                |                              |                        | 3 400                                | 0,8                     | 0,4*10 <sup>-5</sup>                                 |
| Silicate d'alumine | 10                        | 2 600                                 | 200 000                                |                              |                        | 3 000                                | 1,5                     |                                                      |
| Polyéthylène       |                           | 960                                   | 100 000                                |                              |                        | 3 000                                |                         |                                                      |

FIGURE I.5 - Classification des différents types de renforts

#### I.4.2.8 Les principales combinaisons de résine et de renforts

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des combinaisons matrices/renfort les plus couramment utilisées donnant lieu à des composites « hautes performances » (HP) ou « grande diffusion ». On notera que les composites « hautes performances » (HP) se distinguent essentiellement des composites « grande diffusion » (GD) par leurs meilleures propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la traction) et, corollairement, par leur coût plus élevé.

| Résines                         |                | Fibres de renfort |         |         |         |         |
|---------------------------------|----------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                 |                | Verre E           | Verre D | Verre R | Carbone | Aramide |
| Thermodurcissables<br><u>TD</u> | Polyesters     | GD                | GD      |         |         |         |
|                                 | Phénoliques    | GD                |         |         |         |         |
|                                 | Polyuréthanes  | GD                |         |         |         |         |
|                                 | Epoxy          |                   | HP      | HP      | HP      | HP      |
| Thermoplastiques<br><u>TP</u>   | Polypropylènes | GD                |         |         |         |         |
|                                 | PA 6 et 6-6    | GD                |         | HP      |         |         |
|                                 | PA 12, PEEK    |                   |         | HP      | HP      | HP      |

FIGURE I.6 - Tableau de synthèse de l'utilisation des résines et renforts

#### I.4.3 Architecture de renforcements

Les matériaux de renforts confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, ... Ces renforts permettent aussi d'améliorer certaines propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance

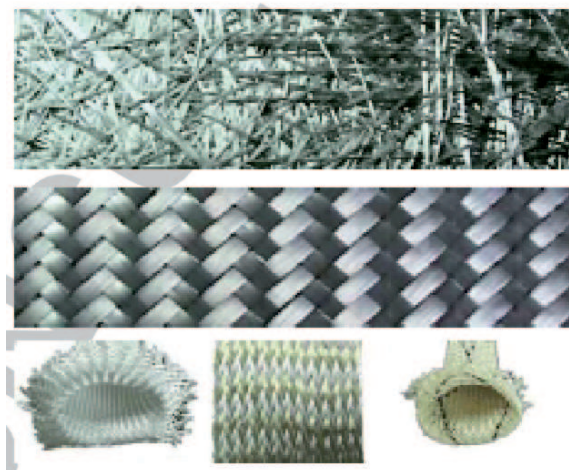
à l'abrasion, propriétés électriques...

Ainsi, les caractéristiques recherchées pour les renforts sont :

- caractéristiques mécaniques élevées
- masse volumique faible
- bonne compatibilité avec les résines
- facilité de mise en oeuvre
- faible coût...

En fonction des utilisations, les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique... Toutefois, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées, et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7. Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales (voir figure I.4.3) :

- sous forme linéique (fils, mèches...)
- sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats...)
- sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes...)



Ainsi, on rencontre plusieurs architectures de renforcements :

- **unidirectionnelle** : les fibres parallèles peuvent se présenter sous deux formes : - sans liaison particulière (roving) - reliées par un fil (nappes).
- **multidirectionnelle aléatoire** : - fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier ; - feutre de fibres agglomérées par un liant : le mat peut être à fibres courtes (longueur inférieure à 50 mm), sans orientation particulière ou à fibres continues.
- **orientée** : le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles) ; suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin. (voir figure I.7)

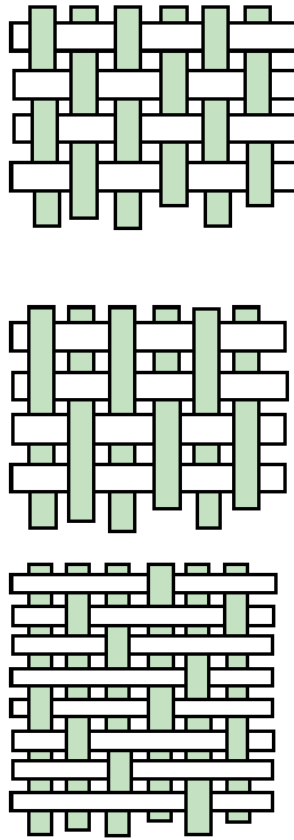
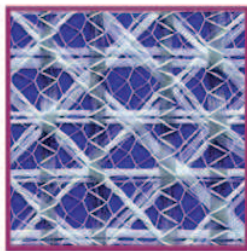
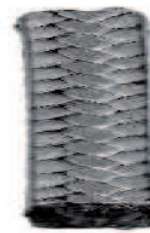


FIGURE I.7 - Représentation des différents tissages avec dans l'ordre la toile ou taffetas, le sergé et le satin

- on réalise également, pour des applications particulières (aérospatial, défense), des armatures de renforcements bi- ou tridimensionnelles (voir figure I.8)



*Tissu multiaxial*



*Tissu 3D ou tresse*

FIGURE I.8 -

Les performances résultantes de ces différents types d'architecture sont présentées dans le tableau I.9.

| Architecture des fibres   | Comportement mécanique recherché | Orientation de la tenue mécanique                      | Taux maximal de renfort | Type de fibres   |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Fibres coupées et broyées | Moyen                            | quelconque                                             | 30%                     | verre            |
| Mats fibres coupées       | Moyen                            | quelconque                                             | 30%                     | verre ou carbone |
| Mats fibres continues     | Moyen                            | orientée                                               | 30%                     | verre            |
| Fibres continues          | Intermédiaire                    | unidirectionnelle                                      | 50 à 70%                | toutes           |
| Tissu                     | Fort                             | bi ou tri directionnelle                               | 30 à 70%                | toutes           |
| Nappe                     | Très fort                        | Unidirectionnelle (Bi-directionnelle si superposition) | 50 à 85%                | toutes           |

FIGURE I.9 - Performances comparées des différents types d'architecture

#### I.4.4 Ensimage

Les renforts destinées à la fabrication des composites reçoivent un ensimage. L'ensimage est une dispersion aqueuse spécifique comportant un agent collant, un agent pontant et des agents antistatiques, permettant d'assurer différents rôles :

- compatibilité de la liaison fibre - matrice
- cohésion interfilamentaire (raideur du fil) pour qu'il soit manipulable
- protection contre l'abrasion générée par la mise en oeuvre (frottement contre pièces métalliques)
- élimination des charges électrostatiques dues aux frottements
- augmentation du mouillage de la fibre au cours de l'imprégnation

L'ensimage est spécifique pour une résine et un procédé donné.

## Chapitre II

# Mise en oeuvre et structures des matériaux composites

### II.1 Mise en oeuvre et procédés des matériaux composites

Trois opérations sont indispensables :

1. Imprégnation du renfort par le système résineux.
2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.
3. Durcissement du système.

soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables, soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques. Il existe différentes techniques mais la plus utilisée est par moulage (voir figure II.1 et II.1).

**Limitation** : taille des pièce = taille des moules.

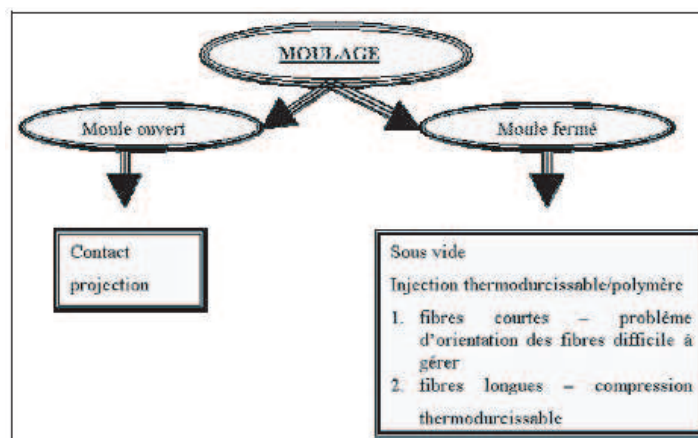


FIGURE II.1

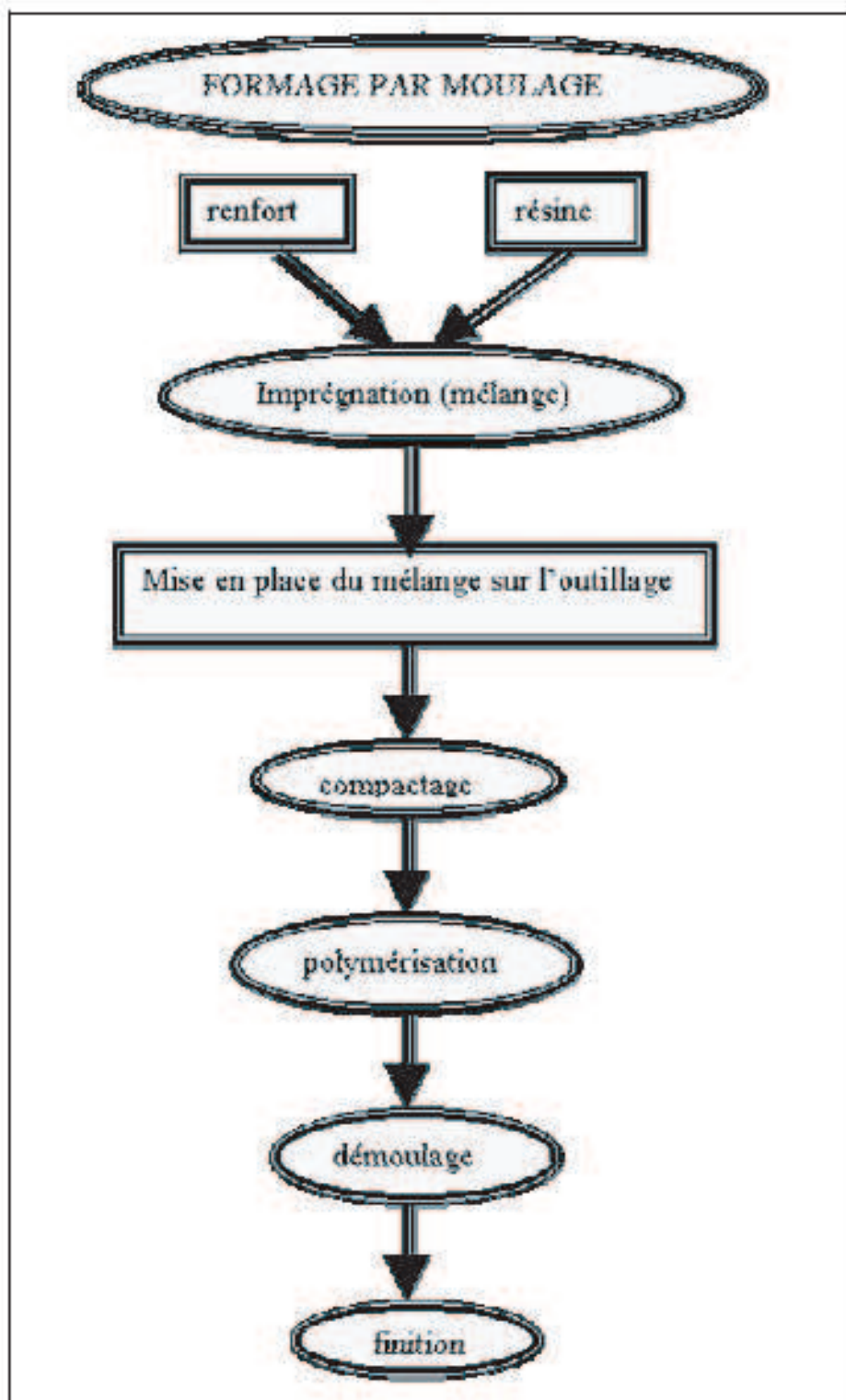


FIGURE II.2

### II.1.1 Classification des procédés en deux grandes familles

- **Procédés humides** (par imprégnation directe) : ils sont généralement adaptés à des petites et moyennes séries.

Exemples :

- Moulage au contact
- Moulage par projection simultanée
- Moulage à froid ou chaud sous presse
- Moulage au sac sous pression et moulage sous vide
- Moulage par injection de résine (RTM = Resin Transfer Moulding avec moule et contre moule)
- Moulage par Injection et Réaction (R.R.I.M. = Reinforced-Reaction Injection Molding) et Mousses (mise en oeuvre du polyuréthane et des systèmes résines / catalyseurs très réactifs)
- Centrifugation
- Pultrusion
- Enroulement filamentaire
- Stratification en continu de plaques et profilés (dépassé)

- **Procédés secs** (par imprégnation indirecte) : ils nécessitent l'utilisation de demiproduits de moulage - préimprégnés en nappes ou en composés pâteux - Exemples :

- Fabrication de préimprégnés et de compounds de moulage ,renfort fibreux - tissus, roving, servant de support à une résine thermodurcissable se présentant dans un état de durcissement incomplet et réversible stable à basse température. Certaines résines thermoplastiques sont également utilisées. Mise en oeuvre des « prepeg » : Ligne d'imprégnation solvant, Hot melt direct ou Hot melt par transfert.

- Les Compounds de moulage sont des préimprégnés plutôt destinés à la fabrication de composites grandes diffusions : tissus, rovings mais plus souvent des fils coupés :

\* SMC (Sheet Moulding Coumpound), lamifié en résine polyester chargée, armée de fibres placées entre 2 films plastiques protecteurs, on distingue :

- . SMC - R : fibres sans orientation
- . SMC - C fibres continues unidirectionnelles
- . SMC - C/R
- . SMC - D : fibres coupées unidirectionnelles

\* SMC hautes performances avec renforts hybrides - verre carbone, kevlar

\* HMC (High Moulding Compound) et XMC (enroulement filamentaire avec orientation spécifique pour améliorer les propriétés)

- \* Pâtes à mouler renforcées de fibres courtes plus visqueuses et plus adaptées à des procédés d'injection à chaud mais caractéristiques mécaniques faibles :
- \* DMC = Dough, BMC = Bulk, TMC = Thick,
- \* ZMC = pas d'endommagement des fibres lors de l'alimentation du compound)

**Par les Procédés secs**, les paramètres de moulage comme le taux de fibres sont mieux contrôlés et les cadences de fabrication plus rapide (applications technologiques). Ils permettent la fabrication de pièces en grande séries. Exemples :

- Compression de préimprégné (SMC)
- Injection de préimprégné
- Drapage et autoclave pour pièces hautes performances (aéronautique), des nappes préimprégnées sont déposées dans un moule et polymérisées par un cycle de cuisson (pression + température). Le procédé est long et lourd mais le contrôle de l'orientation des fibres est très précis.
- Estampage de plaques en thermoplastiques armés (TRE = Thermoplastiques Renforcé Estampable)
- Injection de thermoplastiques armés (TPR = Thermoplastiques Renforcé)

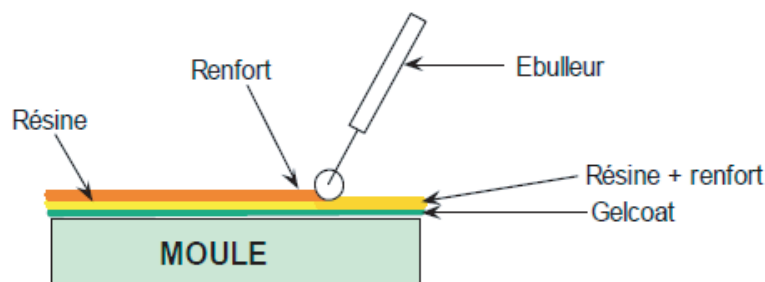
## II.1.2 Description des principaux procédés

### II.1.2.1 Moulage au contact

**Principe** Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

#### Cas d'utilisation

- Procédé pour petites séries : de 1 à 1000 pièces / an
- Pièces de grandes à très grandes dimensions
- Revêtement sur supports divers et in situ



### Matières premières

- Renforts : mats, tissus de fibre de verre, de carbone ou d'aramide (taux de renfort volumique allant jusqu'à 35% dans le cas du verre)
- Résines : polyesters, époxy, phénoliques, vinylesters
- Divers : catalyseur, accélérateur, charges, pigments, agent de démoulage, acétone

### Matériel et énergie

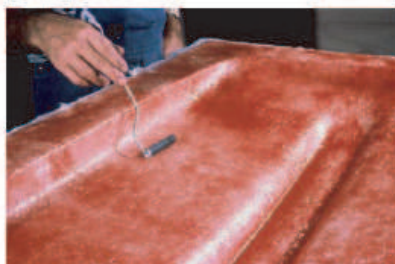
- Moule : simple coque généralement en composite, éventuellement en plusieurs éléments assemblés
- Outillages à mains : ciseaux, pinceaux, ébulleurs, pistolet à peinture ou gel-coateuse
- Electricité : éclairage, ventilation, chauffage
- Air comprimé : motorisation outillage, démoulage

### Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                                  | LIMITES                                       |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Très larges possibilités de forme                          | Une seule face lisse                          |
| Pas de limite dimensionnelle                               | Nécessité de finition (détourage, perçage...) |
| Une surface lisse gelcoatée (aspect, tenue à la corrosion) | Qualité tributaire de la main d'oeuvre        |
| Propriétés mécaniques moyennes à bonnes                    | Faible cadence de production par moule        |
| Investissements spécifiques très faibles                   | Espace de travail important                   |
| Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne | Conditions de travail médiocres               |

### Domaine d'application

- Nautisme
- Piscine
- Génie chimique
- Transport, carrosserie (petites séries)
- Bâtiment, travaux public (coffrage)



### II.1.2.2 Moulage par projection simultanée

#### Principe

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en oeuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- un dispositif de coupe
- projection du renfort (roving)
- un ou deux pistolets projetant simultanément la résine. Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et ébullés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine préaccélérée est catalysée en continu lors de sa projection.

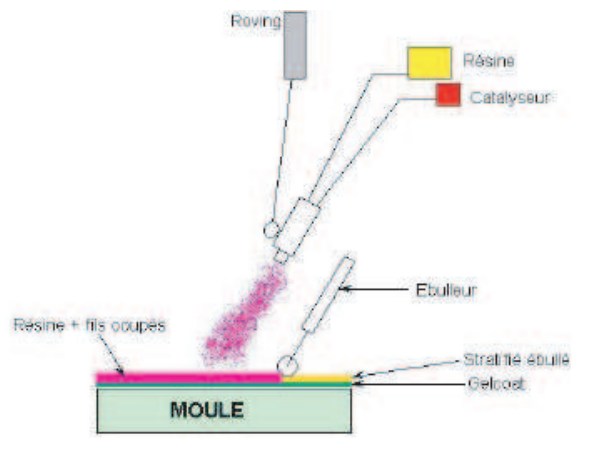


FIGURE II.3

#### Cas d'utilisation

- Production de pièces de moyennes à grandes dimensions
- Recherche de réduction des coûts par rapport au contact
- Petite et moyenne série

#### Matières premières

- Renforts : fibre de verre sous forme de roving assemblés, taux de renfort de 25 à 35% en volume
- Résines : principalement polyesters mais aussi phénoliques ou hybrides
- Divers : catalyseurs, accélérateur, pigments, charges, agent de démoulage, solvant

### Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | LIMITES                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Très larges possibilités de forme et dimensions<br>Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection<br>Productivité plus élevée qu'au contact<br>Coût du roving < mat<br>Investissements très modérés<br>Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne | Une seule face lisse<br>Propriétés mécaniques moyenne<br>Qualité tributaire de la main d'oeuvre<br>Conditions de travail très médiocres si absence d'agencements nécessaires |

### Matériel et énergie

- Moules en composites (simple coque)
- Machine de projection (mélange interne ou externe)
- Dispositif de ventilation, extraction des vapeurs de styrène
- Petit outillage de stratification à la main



- Electricité : éclairage, ventilation, chauffage
- Air comprimé : motorisation outillage, démoulage

### Domaine d'application

- Production de bateaux
- Revêtements
- Bâtiments : façade, articles sanitaires
- Travaux public : coffrages
- Capotage industriel
- Panneaux sandwichs pour camions isothermes

### II.1.2.3 Moulage sous vide

**Principe** Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en oeuvre.

Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

#### Cas d'utilisation

- Production en petites séries de pièces nécessitant deux faces lisses
- Amélioration des conditions de travail et d'hygiène (réduction des émanations de styrène)

#### Matières premières

- Renforts : mats fils coupés ou fils continus, préformes, tissus
- Résines : polyester, vinylester, phénolique, époxy
- Divers : catalyseur, accélérateur, pigments, charges, agent de démoulage, solvant

#### Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                    | LIMITES                                            |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Deux faces lisses, éventuellement gelcoatées | Possibilités de formes plus réduites qu'au contact |
| Qualité non tributaire de la main d'oeuvre   | Mise au point parfois difficile                    |
| Qualité constante                            |                                                    |
| Bonne cadence de production                  |                                                    |
| Nécessite peu de surface                     |                                                    |
| Investissements très modérés                 |                                                    |
| Bonnes conditions de travail et d'hygiène    |                                                    |

#### Matériel et énergie

- Moules et contre-moules en composites ou pellicules souples
- Pompes à vide avec réservoir tampon

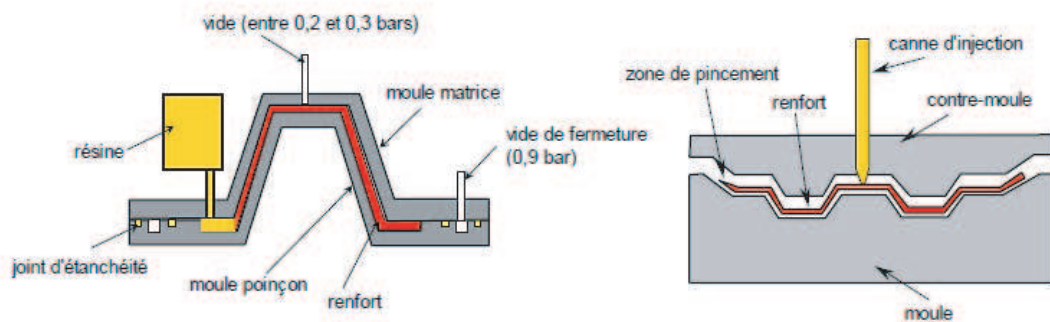
Electricité, air comprimé souhaitable (démoulage)

#### Domaine d'application

- Bâtiment : coupoles d'éclairage zénithal
- Transports : panneaux sandwichs pour caion isothermes, conteneurs
- Pièces diverses : casques de protection enveloppants, capotages...

#### II.1.2.4 Moulage par injection basse pression de résine - RTM

**Principe** Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. Après durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce démoulée.



#### Cas d'utilisation

- Procédé pour moyennes séries : 1000 - 10000 pièces/an
- Pièces demandant une reproductibilité d'épaisseur

#### Matières premières

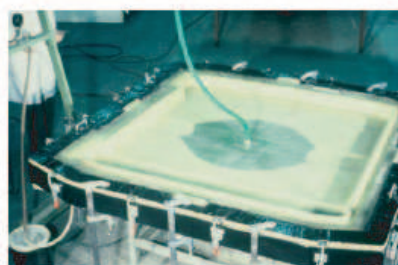
- Renforts : mats de fils coupés ou continu, préformes, voiles de surface ou/et tissus de verre, carbone, aramide. Taux de renfort : 20 - 60%
- Résines : polyesters, phénoliques (résols), époxydes, vinylesters
- Divers : catalyseurs, accélérateur, pigments, charges, agents démoulants, solvant de rinçage

## Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                                                                       | LIMITES                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Deux faces lisses, éventuellement gelcoatées<br>Dimensions jusqu'à 7 m <sup>2</sup><br>Qualité non tributaire de la main d'oeuvre<br>Qualité constante<br>Cadence de production élevée<br>Nécessite peu de surface<br>Investissements très modérés<br>Bonnes conditions de travail et d'hygiène | Limité aux formes peu ou moyennement complexes<br>Taux de renforcement et caractéristiques mécaniques moyennes à élevées<br>Nécessité d'effectuer des finitions post moulage |

## Matériel et énergie

- Moule et contre-moule en composite rigides et résistants avec système de fermeture rapide. Variantes métallos-composites et métalliques.
- Appareillage d'injection de résine : pot sous pression ou système à pompes doseuses
- Appareillage de manutention des moules (ouverture/fermeture)



- Electricité, air comprimé

## Domaine d'application

- Eléments de carrosserie pour véhicules de tourisme ou utilitaires
- Cuves de petites et moyennes dimensions
- Capotages
- Pièces industrielles diverses
- Capotage industriel
- Fourches de vélo, raquettes de tennis

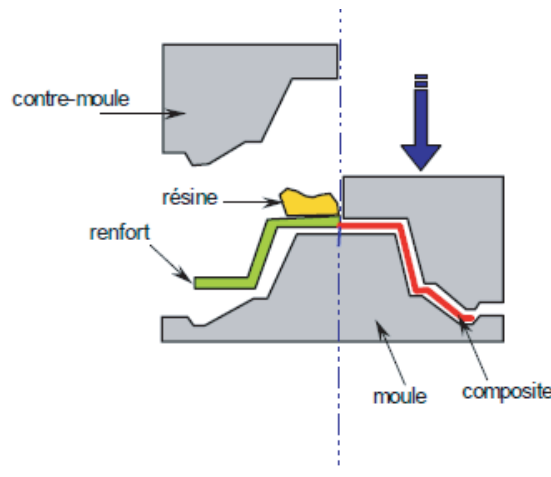
#### II.1.2.5 Moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression

**Principe** Moulage à l'aide d'une presse à compression entre moule et contre-moule rigides en composite, initialement sans apport thermique extérieur.

Moule ouvert, le renfort (mat) est posé sur la partie inférieure du moule et la résine, dotée d'un système catalytique très réactif, est versé en vrac sur le renfort.

La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l'élévation de température du moule due à l'exothermie de la réaction, ce qui permet un démoulage rapide.

Les performances du procédé peuvent être considérablement améliorées par l'usage de moules métaloplastiques, voire métalliques, et d'un système de régulation thermique basse température.



#### Cas d'utilisation

- Production en moyenne séries (500 à 5000 unités)

#### Matières premières

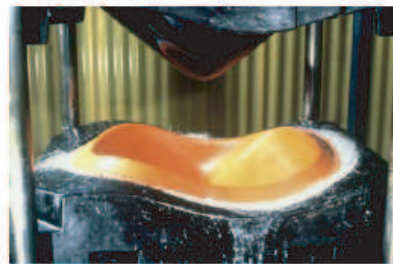
- Renforts : mat de fils continus, liant basse solubilité
- Résines : polyesters
- Divers : catalyseurs, accélérateurs, charges, pigments, agents démoulants

**Principales caractéristiques**

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                                            | LIMITES                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Deux faces lisses<br>Dimensions jusqu'à $7\text{ m}^2$<br>Qualité non tributaire de la main d'oeuvre<br>Qualité constante<br>Cadence de production élevée<br>Nécessite peu de surface<br>Investissements très modérés<br>Conditions de travail et d'hygiène normales | Limité aux formes peu complexes<br><br>Limité aux dimensions moyennes ( $2\text{ m}^2$ )<br>Durée de vie des moules courtes (1500 à 4000 pièces)<br>Nécessité d'effectuer des finitions post moulage |

**Matériel et énergie**

- Presse compression basse pression ( $30\text{ t/m}^2$  utiles) à vitesse de fermeture réglable
- Moule et contre-moule : caissons en composites et béton de résine



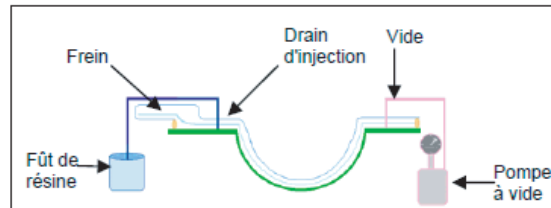
- Electricité, air comprimé

**Domaine d'application**

- Capotages divers
- Bacs de manutention

### II.1.2.6 Moulage l'infusion de résine sous membrane souple

**Principe** Le principe repose sur le dépôt, dans un moule femelle, des renforts secs (tissus, âmes, etc.) qui vont concevoir la pièce composite, et de créer un système étanche à l'air à l'aide d'une bâche à vide. L'infusion consiste ensuite à injecter de la résine, par dépression réalisée sur la pièce, sur les tissus déposés à sec.



#### Cas d'utilisation

- Production : petite séries (facilement adaptable, permet la réalisation de grande surface)
- Pièces à très bonne résistance mécanique

#### Matières premières

- Renforts : Tous types de renfort (tissus, matériaux sandwiches etc.)
- Résines : polyester, époxyde

#### Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                                                                                                                                                            | LIMITES                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pas d'émission de COV<br>Excellente reproductibilité et homogénéité des caractéristiques<br>Taux de renfort pouvant atteindre 65%<br>Bon compactage des tissus<br>Bonne imprégnation | Difficulté de mise en oeuvre et de la gestion des paramètres<br>Matériel non réutilisable |

#### Matériel et énergie

- Pompe à vide
- Fût de résine
- Moule femelle gel-coaté , tissus de drainage (Soric®, mousses Diab®, filet Diatex®) et une bâche souple



- Electricité

### **Domaine d'application**

- Industrie automobile/nautique
- Capot voiture
- Coque bateau

#### **II.1.2.7 Moulage par injection de compound - BMC**

**Principe** Le compound B.M.C (Bulk Molding Compound) préparé dans un malaxeur est une masse à mouler constituée de résine, de charges et d'adjuvants divers, renforcée par des fils de verre coupés.

Le compound est moulé à chaud (130 - 150 °C) par injection (principalement) entre moule et contre-moule en acier usiné. La pression (50 à 100 bars) de fermeture du moule entraîne le fluage de la matière préalablement dosée et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court permet un démoulage rapide.



### **Cas d'utilisation**

- Production en grandes séries
- Pièces de taille petite et moyenne, plus ou moins épaisses

**Matières premières** Compound du commerce ou compound préparé en interne :

- Renfort : fils de verre coupés (6 à 25 mm) à raison de 10 à 28%

- Résine polyester (principalement), catalyseur à chaud, agent de démoulage, charges, pigments, éventuellement agents anti-retrait et de mûrissement

### Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                                                             | LIMITES                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Possibilité de formes très complexes, finitions intégrés<br>Grande précision de moulage<br>Bon état de surface<br>Cadences de moulage élevées en fonction de l'épaisseur<br>Coût de matière réduit<br>Non tributaire de la main d'oeuvre<br>Bonnes conditions de travail et d'hygiène | Investissements assez élevés<br>Propriétés mécaniques modestes<br>Nécessité de doser la matière<br>Limites dimensionnelles |

### Matériel et énergie

- Préparation : moyens de pesée, malaxeur pour la préparation du compound
- Moulage : moule en acier usiné chromé thermorégulé, presse d'injection ou de compression à vitesse de fermeture réglable
- Electricité, air comprimé

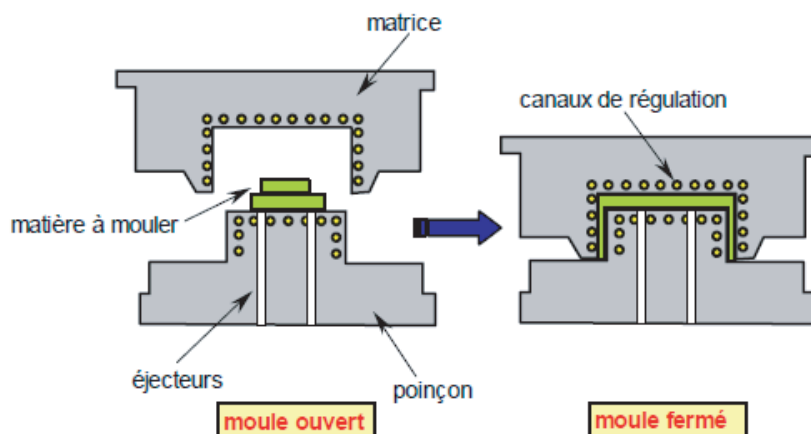
### Domaine d'application

- Pièces pour appareillages électriques
- Pièces automobiles sous capot
- Pièces industrielles diverses

#### II.1.2.8 Moulage par compression de mat préimprégné - SMC

**Principe** Le mat préimprégné SMC (Sheet Molding Compound) est constitué d'une nappe de fils coupés ou continus, imprégnée par un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques divers.

Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat préimprégné est moulé à chaud (140 à 160 °C) par compression entre un moule et un contre-moule en acier usiné. La pression (50 à 100 bars) entraîne le fluage de la matière et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court (en fonction de l'épaisseur) permet un démoulage rapide.



### Cas d'utilisation

- Production en grandes séries
- Pièces d'aspect

**Matières premières** Mat préimprégné du commerce ou compound préparé en interne :

- Mélange d'imprégnation : polyesters, agents compensateurs de retrait, charges, catalyseurs, inhibiteurs, agents de mûrissement, agents de démoulage, pigments
- Renfort : fils de verre spécifique sous forme de roving (taux de renfort 25 à 50% pondéral)

### Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | LIMITES                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Possibilité de formes très complexes, finitions intégrées<br>Capacité dimensionnelle élevée : jusqu'à 3-5 m <sup>2</sup><br>Grande précision de moulage<br>Etat de surface carrosserie prêt à peindre<br>Bonnes propriétés du matériau : mécaniques, thermiques, tenue au feu, anti-corrosion<br>Cadences de moulage élevées<br>Coût de matière réduit<br>Non tributaire de la main d'oeuvre<br>Larges possibilités d'automatisation<br>Bonnes conditions de travail et d'hygiène | Investissements élevés à très élevés<br>Cadence de moulage et constance de qualité encore un peu insuffisantes pour la grande série automobile |

### Matériel et énergie

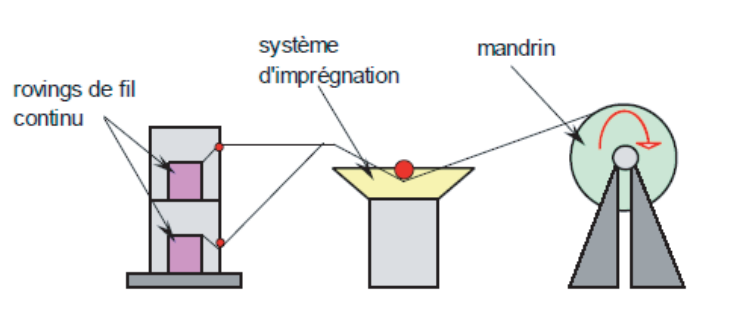
- Eventuellement, ligne de production de mat préimprégné
- Presse compression haute pression, à vitesses de fermeture réglables
- Moules en acier chromés thermorégulés
- Electricité, air comprimé, éventuellement circuit de chauffage (huile, vapeur)

### Domaine d'application

- Industrie automobile (tourisme et utilitaire) : pièces de carrosseries sous capots, pièces de protection
- Industrie électrique : coffrets de comptage, réglette d'éclairage
- Pièces industrielles diverses

#### II.1.2.9 Moulage par enroulement filamentaire

**Principe** Procédé de moulage limité aux formes de révolution. Initialement, destiné à la réalisation d'enveloppes de révolution nécessitant de hautes performances mécaniques par enroulement progressif sur un mandrin, selon un angle déterminé de fils de verre imprégnés de résine. Par la suite, le procédé a été étendu à des structures moins performantes en associant aux rovings bobinés d'autres types de renfort (fils coupés, mat, tissu) appliqués de façon adaptée.



### Cas d'utilisation

- Toutes pièces de révolution à produire en série
- Pièces nécessitant une résistance élevée

### Matières premières

- Renforts : rovings spécifiques à l'enroulement (éventuellement préimprégnés), roving coupé, mats de fils coupés, tissus uni/bi-directionnels, mats de surface
- Résines : polyester, époxy, vinylester, phénoliques
- Divers : catalyseurs, accélérateurs

**Principales caractéristiques**

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | LIMITES                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pièces à haute, voire très haute résistance<br>(taux de renfort jusqu'à 80% pondéral,<br>fils continus orientés selon la direction<br>des contraintes)<br>Très grande latitude dimensionnelle<br>(de quelques mm à plusieurs mètres en diamètre et longueur)<br>Part de main d'oeuvre réduite : mécanisation<br>Cadences de production élevées | Formes de révolution seulement<br>Une seule face lisse<br>Investissements assez élevés<br>(lignes industrielles) |

**Matériel et énergie**

- Machines d'enroulement, très nombreux types adaptés à chaque cas d'application
- Mandrins



- Electricité, air comprimé

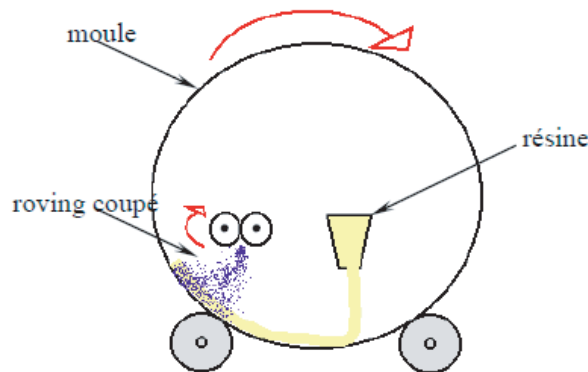
**Domaine d'application** Sport : perche, canne à pêche, bouteille de plongée

- citernes de transport, réservoirs de stockage
- Appareillage de génie chimique
- Industrie électrique
- Armement (tubes lance-roquettes...)
- Automobile : ressorts de suspension

**II.1.2.10 Moulage par centrifugation**

**Principe** Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. A l'intérieur d'un moule cylindrique en rotation à basse vitesse, on dépose des fils coupés à partir de roving (ou du mat),

de la résine catalysée et accélérée et éventuellement des charges granulaires. Puis, on augmente la vitesse de rotation du moule pour densifier et débuller la matière. Après durcissement de la résine, éventuellement accélérée par un apport thermique, on peut extraire très facilement la pièce du moule.



### Cas d'utilisation

- Production de tuyau (écoulement gravitaire et basses pression)
- Production de grandes viroles (moulage par rotation : centrifugation basse vitesse)

### Matières premières

- Renforts : roving coupé in situ (mats disposés à l'arrêt pour petits diamètres)
- Résines : polyesters, vinylesters, éventuellement époxy
- Divers : systèmes catalytiques, pigments, sable

### Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                                          | LIMITES                                                         |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Deux faces parfaitement lisses                                     | Seulement les formes cylindriques (ou très faiblement coniques) |
| Larges possibilités dimensionnelles                                | Pas de possibilité de variation d'épaisseur                     |
| Matériau de très bonne qualité (pas de bulles)                     | Caractéristiques mécaniques moyennes                            |
| Aucune perte de matière                                            | Investissements élevés                                          |
| Haut niveau de mécanisation, possibilité d'automatisation complète | les moules doivent être parfaitement équilibrés                 |
| Bon niveau de productivité                                         |                                                                 |

**Matériel et énergie**

- Machine de centrifugation, dispositif d'alimentation / coupe de roving, résine
- Moules : diamètre 0,1 à 0,5 mètres
- Electricité, air comprimé

**Domaine d'application**

- Tuyaux : jusqu'à 2 m de diamètre
- Cuves (diamètre 1 à 2 m)
- Silos (diamètre 4 à 5 m, longueur 10 à 12 m)
- Cages de pressoirs à vin

**II.1.2.11 Moulage par pultrusion**

**Principe** Le procédé est destiné à la réalisation en continu de profilés de sections constantes. Des renforts continus, rovings divers, mats et tissus en bandes de largeurs appropriées, tirés par un banc de traction situé en fin de ligne de production, sont successivement prédisposés de façon précise, imprégnés de résine et mis à la forme désirée par passage à travers une filière chauffée dans laquelle s'effectue le durcissement de la résine.

**Cas d'utilisation** Réalisation de profilés en quantités significatives (plusieurs milliers de mètres linéaires).

**Matières premières**

- Renforts : rovings directs, fils texturés, mats fil continus (liant insoluble), tissus
- Résines : polyester, époxy, vinylester, acrylique, phénolique
- Divers : systèmes durcisseurs, charges, pigments, lubrifiants

### Principales caractéristiques

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | LIMITES                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Toutes formes de sections, même creuses, angles vifs<br>Aspect de surface lisse, moyen<br>Très grande résistance mécanique, surtout longitudinale<br>Bonne productivité : 0,2 à 2,5 m/min selon résines et sections<br>Très faible part de main-d'oeuvre<br>Bonnes conditions de travail et d'hygiène niveau de productivité | Pas de possibilité de variation de sections<br>Profilé nécessairement rectiligne sauf Pull Forming<br>Investissement relativement élevé |

### Matériel et énergie

- Ligne de pultrusion : cantres (alimentation renforts), organes de guidage, système d'imprégnation, filière avec système de chauffage, banc de traction, banc de découpe.
- Electricité, air comprimé

### Domaine d'application

- Boulons d'ancrage, âmes d'isolateurs électriques haute tension, cannes à pêche
- Tubes de structure)
- Tous profilé isolant électrique ou résistant à la corrosion
- Racks à bagages pour bus

#### II.1.2.12 Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres broyées - RRIM

**Principe** Il s'agit principalement du moulage de polyuréthannes rigides.

Le renfort, fibre de verre broyée, est incorporé dans le polyol, à raison de 10-20% pondéral (sur le produit final).

Le processus de moulage reste le même que pour les PU non renforcés : alimentation dosée sous pression de chacun des deux composants (polyol et isocyanate), mélange, injection dans un moule fermé, réaction, durcissement, démoulage.

### Cas d'utilisation

- Production : moyennes à grandes séries
- Pièces pour lesquelles les propriétés des PU sont insuffisantes

**Matières premières**

- Renforts : fibre de verre broyée (0,1 à 0,3 mm)
- Résines : polyols et isocyanate

**Principales caractéristiques**

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                 | LIMITES                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Pièces de formes complexes,<br>de moyennes dimensions<br>Faible densité<br>Propriétés mécaniques nettement meilleures<br>que celles de PU purs<br>Réduction du retrait thermique<br>Tenue en température<br>Aspect correct après peinture | Investissement relativement élevé |

**Matériel et énergie**

- Machine à injecter les polyuréthannes
- Moule / contre-moule : composite, alliage léger, acier (selon les séries à produire), système de fermeture de moule
- Electricité, air comprimé

**Domaine d'application**

- Industrie automobile
- Extension d'ailes
- Eléments d'aménagement d'intérieur d'habitable

**II.1.2.13 Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues - SRIM**

**Principe** Il s'agit d'un moulage entre moule et contre-moule. Le renfort sous forme de mats ou de tissus (20 à 60% pondéral) est disposé préalablement dans le moule chauffé (100 - 150 °C). Le système de résine à deux composants très réactifs est injecté sous pression (20 - 30 bars). Après durcissement (1 à 3 min), la pièce peut être démoulée.

**Cas d'utilisation**

- Production : moyennes à grandes séries (mais inférieure au RRIM)
- Pièces à bonne résistance mécanique

**Matières premières**

- Renforts : mats de fils continus préformés, tissus
- Résines : polyuréthannes, polyisocyanurate, polycarbonate

**Principales caractéristiques**

| AVANTAGES                                                                                                                                                                                                                                           | LIMITES                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pièces de formes type "embouti",<br>moyenne complexité<br>Matériau de moyenne densité (1,2 à 1,7)<br>Bonnes propriétés mécaniques<br>Temps de cycle de moulage compatibles<br>avec la grande série (1 à 2 min)<br>Procédé entièrement automatisable | Limites dimensionnelles<br><br>Investissement relativement élevé (procédé<br>encore au stade de développement industriel) |

**Matériel et énergie**

- Machine d'injection des mélanges à deux composants
- Moule acier usiné, poli, avec système de chauffage
- Presse pour ouverture / fermeture du moule sous pression
- Electricité, air comprimé

**Domaine d'application** Industrie automobile

- Industrie automobile
- Poutre de pare-chocs
- Traverse, longeron, châssis

**II.2 Architecture des matériaux composites**

L'objectif de cette section est de présenter l'architecture générale des matériaux composites souvent considérés sous la forme de plaques et de coques qui conçoivent grâce aux procédés précédemment présentés.

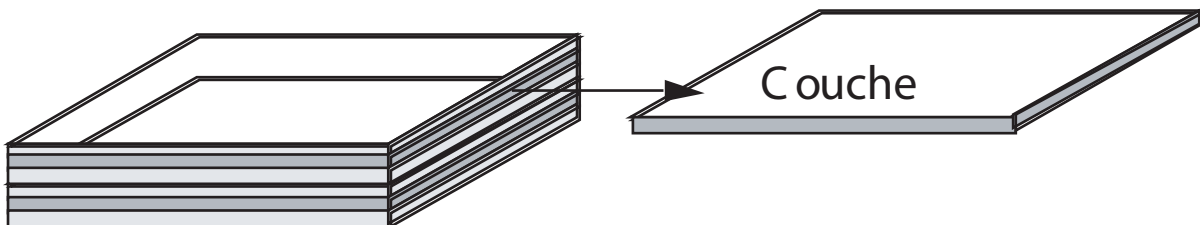
**II.2.1 Monocouches**

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

### II.2.2 stratifiés

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bi-directionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir.

Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle micro associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macro liée à la structure. A cette échelle, appelée méso-échelle, une structure stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso-constituants (figure II.2.2) qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre. En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couches).



#### II.2.2.1 Désignation des structures stratifiées

Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches (plis). L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0.125 mm pour un matériau carbone époxy de type Aéronautique et 0.3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'Industrie Nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence. Un

stratifié est codifié de la façon suivante : Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence " x ". Sur les figures suivantes, les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut.

Les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole " / ". Exemple : (cf. figure II.2.2.1).

Les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique. Exemple : (cf. figure II.2.2.1).

En cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche.

En cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole " s " indique la symétrie.

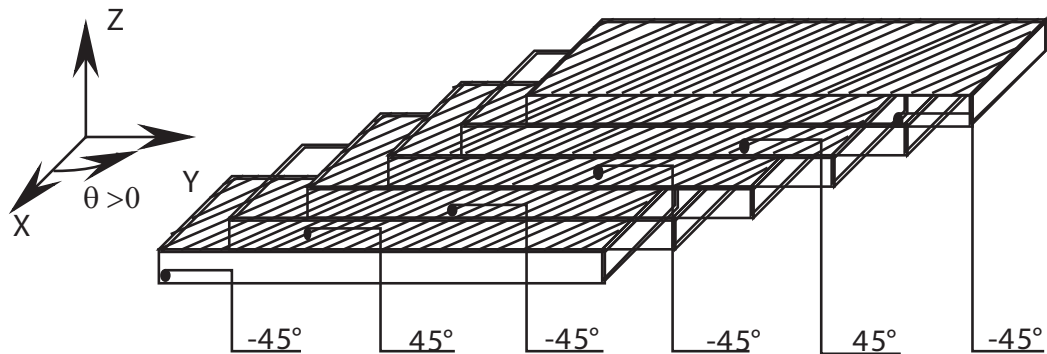


FIGURE II.4

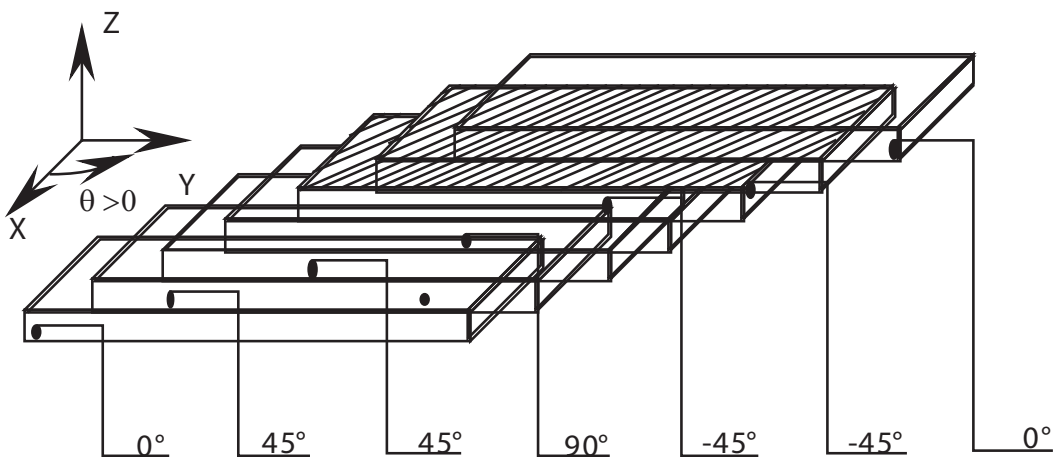


FIGURE II.5

### II.2.2.2 Différents types de stratifiés et exemples de codification

Dans la suite, on présente différentes stratifications avec leur codification. Les couches du stratifiés sont représentées par un tableau vertical. À titre d'exemple, quatre stratifiés sont donnés ainsi que leur codification.

- Stratifié de type  $[45/-45/45/-60/60/90]$
- Stratifié symétrique  $45/-45/45/45/-45/45]=[45/-45/45]_s$
- Séquence : La répétition de séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée. Par exemple :  $[(0/45/90)_2]_s$
- Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de nature différentes. Il est alors nécessaire de les mentionner dans la désignation. Par exemple :

$[0_v, +45_c, -45_c, 90_c]_s$  avec v : verre, c : carbone

### II.2.3 Sandwichs

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée figure II.2.3.

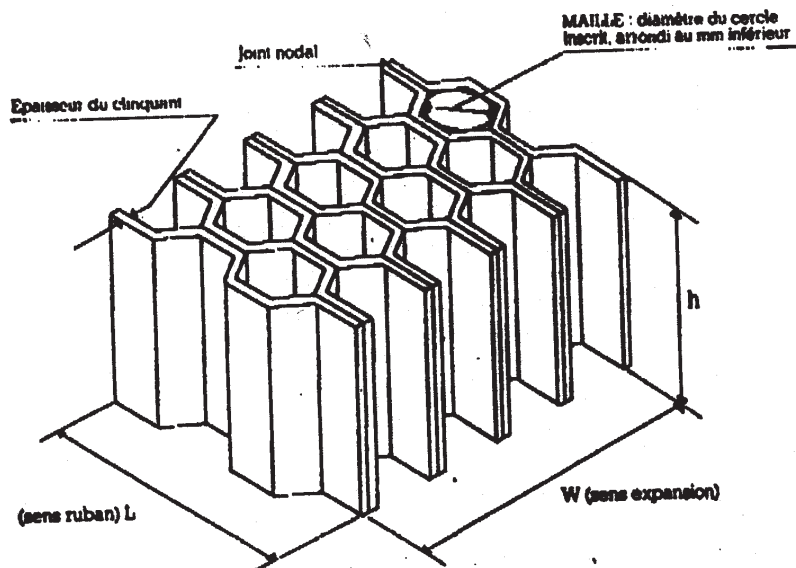


FIGURE II.6

Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- J.M. Berthelot - Matériaux composites - comportement mécanique et analyse des structures - Masson
- Glossaire des matériaux composites - CARMA - 2006
- Nadia BAHLOULI - Cours matériaux composites - IPST-ULP